网络出版时间:2026-04-08 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.10.007

稻油秸秆还田的固碳效应及对水稻产量的影响

徐明月[1,2],闫宁[3],杨静[1,2],宋子涵[1,2],肖海[1,2],任兰天[1,2],王小华[1,2]

(1 安徽科技工程大学 农学院,安徽 凤阳 233100;2 安徽省作物智慧种植与加工技术工程研究中心,安徽 凤阳 233100;
3 安徽科技工程大学 动物科学学院,安徽 凤阳 233100)

[摘 要] 【目的】研究稻油秸秆不同还田方式和还田量对土壤的固碳效应及水稻产量的影响,为提出更适合在稻油轮作区作物高产、超高产趋势下推广使用的秸秆还田方式提供理论支撑。【方法】通过两年田间试验,在稻油两种秸秆还田下,设置两种还田方式(秸秆集中掩埋还田(B)、秸秆粉碎旋耕还田(R))和两种还田量(全量秸秆还田(W)、两倍量秸秆还田(T))以及不还田的对照组(CK),共计5个处理,分析稻油秸秆不同还田方式和还田量下土壤总有机碳、活性有机碳和碳库管理指数及水稻产量的变化特征。【结果】与秸秆不还田的CK相比,在水稻秸秆还田条件下,两倍量秸秆粉碎旋耕(TR)处理显著提高了2023年水稻季0~30 cm土层的土壤总有机碳含量,0~20 cm土层土壤活性有机碳含量以及0~20 cm土层土壤碳库管理指数($P<0.05$);两倍量秸秆集中掩埋(TB)处理显著提高了2024年水稻季0~30 cm土层的土壤总有机碳、活性有机碳以及土壤碳库管理指数($P<0.05$)。在油菜秸秆还田条件下,TR处理显著提高了2023年水稻季0~10 cm土层的土壤总有机碳含量,0~30 cm土层土壤活性有机碳含量以及土壤碳库管理指数($P<0.05$);TB处理显著提高了2024年水稻季0~30 cm土层的土壤总有机碳、活性有机碳以及土壤碳库管理指数($P<0.05$)。在实收产量方面,2023年秸秆全量粉碎旋耕(WR)处理相比CK显著增产了13.41%;2024年两倍量秸秆集中掩埋(TB)处理相比CK显著增产了13.68%,且相同处理下,TB处理第二年产量相比第一年增加更大,增幅为16.68%。同时,稻油秸秆还田下土壤不同土层间碳库指标两两之间均呈显著或极显著的正相关关系。【结论】秸秆粉碎旋耕还田方式在秸秆还田一年内的效果较好,但秸秆集中掩埋处理在秸秆腐解一年后对土壤碳库和作物产量的影响更为显著,以两倍量表现突出,且表现出一定的还田后效。因此两倍量秸秆集中掩埋处理可在淮河及长江流域水稻高产、超高产背景下的稻油轮作区推广与应用。

[关键词] 稻油轮作;秸秆还田;固碳效应;土壤总有机碳;土壤活性有机碳;水稻产量

[中图分类号] S146.1;S511 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)10-0058-11

Effects of rice and rapeseed straw return on carbon sequestration and rice yield

XU Mingyue[1,2], YAN Ning[3], YANG Jing[1,2], SONG Zihan[1,2], XIAO Hai[1,2], REN Lantian[1,2], WANG Xiaohua[1,2]

(1 *College of Agriculture, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui* 233100, *China*;
2 *Anhui Engineering Research Center for Crop Intelligent Planting and Processing Technology, Fengyang, Anhui* 233100, *China*;
3 *College of Animal Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui* 233100, *China*)

Abstract: 【Objective】 By investigating the effects of different methods and application rates of rice-rapeseed straw return on soil carbon sequestration and rice yield, this study provides theoretical support for identi-

[收稿日期] 2025-09-01 [修回日期] 2025-12-30
[基金项目] 安徽省教育厅重点项目(2022AH051629);安徽科技学院引进人才项目(NXYJ202002);安徽科技学院作物学重点建设学科建设经费项目(XK-XJGF001);安徽高校协同创新项目(GXXT-2023-102)
[作者简介] 徐明月(1998—),男,江苏赣榆人,在读硕士,主要从事农业废弃物高效利用研究。E-mail:851098707@qq.com
[通信作者] 王小华(1987—),男,安徽安庆人,讲师,博士,主要从事油料作物高产栽培及农业废弃物高效利用研究。E-mail:wangxh@ahstu.edu.cn

fying preferable straw return practices in rice-rapeseed rotation areas under the trend towards high and ultra-high crop yields.【Method】A two-year field experiment was conducted with a total of five treatments under rice-oilseed rape straw incorporation scenarios. The treatments included two return methods（centralized burial return（B）and shredded rotary tillage return（R））and two return rates（full straw return（W）and double-rate straw incorporation（T））, alongside a no-incorporation control（CK）. The variations in soil total organic carbon, active organic carbon, carbon pool management indices, and rice yield under different straw incorporation methods and rates were analyzed.【Result】Compared with the CK treatment, the double-rate straw shredded rotary tillage（TR）treatment significantly increased total organic carbon content in the 0－30 cm soil layer in 2023, and active organic carbon content and the carbon pool management index in the 0－20 cm soil layer（$P<0.05$）. In 2024, the double-rate straw centralized burial（TB）treatment significantly increased the soil total organic carbon, active organic carbon, and soil carbon pool management index in the 0－30 cm soil layer（$P<0.05$）. Under rapeseed straw incorporation, the TR treatment in 2023 significantly increased the total soil organic carbon content in the 0－10 cm soil layer, and the active soil organic carbon content and the soil carbon pool management index in the 0－30 cm soil layer（$P<0.05$）. The TB treatment in 2024 significantly increased the soil total organic carbon, active organic carbon, and soil carbon pool management index in the 0－30 cm soil layer（$P<0.05$）. In terms of actual yield, the full-volume shredded rotary tillage treatment（WR）in 2023 yielded 13.41% higher than CK. In 2024, the TB treatment yielded 13.68% higher than CK. Notably, under TB treatment, the yield increase from the first to the second year was 16.68%. Futhermore, under straw incorporation, all carbon pool indicators were significantly positively correlated across different soil layers.【Conclusion】Straw incorporation via shredding and rotary tillage yielded favorable results in the first year of straw return. In contrast, the centralized burial treatment, especially with a double amount of straw, demonstrated more pronounced effects on the soil carbon pool and crop yield in the subsequent year, indicating a certain delayed effect following incorporation. Therefore, the double-rate straw concentrated burial treatment is recommended for promotion in rice-rapeseed rotation areas within the Huai River and Yangtze River basins, where high and ultra-high rice yields are achieved.

Key words: rice-rapeseed rotation; straw return to fields; carbon sequestration effect; soil total organic carbon; soil active organic carbon; rice yield

稻油轮作，即水稻和油菜轮换进行种植的复种模式[1]。该模式是一种水旱轮作技术，也是用地养地结合的种植技术。依托于技术创新和农业机械化的应用，稻油的产量逐年提高，实现了作物的高产及超高产，同时也产生了大量的稻油秸秆。目前我国主要农作物秸秆的处理主要还是以肥料化还田为主[2]。大量研究表明，采用合理的秸秆还田措施可以促进土壤养分活化[3]，改善土壤环境和性状[4]，从而有利于作物的生长和增产[5]，对促进可持续农业的发展和保障粮食安全意义重大。传统秸秆粉碎旋耕还田存在秸秆大量集中于耕作层，影响土壤耕作和下茬作物的正常生长等问题[6]，且秸秆腐解速度快、不利于土壤碳汇功能的提升[7]。因此在秸秆量急剧增加的趋势下，开发一种可以规避传统秸秆粉碎旋耕还田存在的问题及缺点的新型还田方式，并对其在作物生长及固碳方面的表现展开研究具有明显的现实意义。

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库，是微生物将植物根系、凋落物等腐解产生的碳输入土壤中，经过土壤呼吸消耗后稳定储存于土壤中的碳[8]。土壤有机碳含量是衡量土壤质量好坏和土壤肥力水平高低的一个重要指标，秸秆还田可以增加土壤有机碳及其组分含量，提升土壤固碳速率[9]。秸秆还田后，黑钙土中的土壤大团聚体固定的有机碳含量随着还田量的增加而增加[10]。同时，也有研究利用土壤碳库管理指数结合土壤碳库活度来表征不同农田管理措施下土壤有机碳及其组分的增减状况，其值越高说明农田管理措施对土壤培肥效果越好[11]。徐蒋来等[12]研究也指出，秸秆还田量和还田时间对土壤不稳定性碳库组分和碳库管理指数具有明显的影响。ZHANG 等[13]的研究结果显示，秸秆还田可以不同程度地促进水稻产量构成因素，如

有效穗数、总穗粒数和千粒质量的增加,提高结实率,进而提高水稻产量。稻麦或稻油轮作模式下秸秆全量翻埋还田配合合理的氮肥施用能有效促进水稻植株氮素吸收,显著提高水稻产量,以稻油轮作模式增产效果最佳[14]。也有研究结果表明,油菜秸秆覆盖免耕或翻埋还田均会在一定程度上抑制水稻根系活力和分蘖,还田量越大,表现越明显,翻埋处理抑制效应大于覆盖处理[15]。何巧玲等[16]的研究也表明,油菜秸秆翻埋还田降低了水稻的分蘖数、鲜质量和干物质量,存在明显揠苗现象,但对水稻产量构成因素和产量没有显著影响。而LI等[17]和CHEN等[18]研究认为,秸秆还田后,稻田淹水环境使土壤氧化还原电位降低、还原性物质含量增加,不利于水稻的正常生长。

在淮河、长江中下游流域稻油轮作区,秸秆还田对提高土壤碳库、土壤肥力和作物产量具有重要意义,但当前国内学者针对该区域在秸秆还田对土壤固碳效应和稻油生长方面的研究结果,因秸秆的还田方式、还田量或区域土壤气候状况等因素的差异而表现不尽相同,且传统秸秆粉碎旋耕还田存在的问题也决定了其不适合在稻油高产、超高产趋势情况下继续推广应用,同时针对稻油高产、超高产前提下的还田技术研究却鲜有报道。为此,本研究在前期稻麦轮作区“秸秆集中沟埋”土壤耕作技术体系[19]的基础上,采用秸秆集中掩埋还田与传统秸秆粉碎旋耕还田两种还田方式,研究两种还田方式和不同还田量下土壤固碳效应及对水稻产量的影响,为稻油轮作区作物高产、超高产前提下适宜秸秆还田技术的提出提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验地位于安徽省滁州市凤阳县府城镇安徽科技工程大学种植科技园(117°33′26″ E,32°52′30″ N)。该地属于北亚热带江北区亚湿润季风气候向温湿带的过渡地带,气候温和,四季分明,光照充足,水热同季,干冷同期;年平均气温为14.9 ℃,年降水量904.4 mm,年蒸发量1 609.7 mm。试验田土壤类型为潴育型水稻土,种植制度为稻油轮作。供试前0~20 cm土层土壤养分含量:有机质含量15.13 g/kg,全氮含量0.88 g/kg,有效磷含量9.80 mg/kg,速效钾含量133.95 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置不同秸秆还田方式(秸秆粉碎旋耕还田(R)、秸秆集中掩埋还田(B)),以及不同还田量(全量秸秆还田(W)、两倍量秸秆还田(T)),即全量秸秆粉碎旋耕还田(WR)、全量秸秆集中掩埋还田(WB)、两倍量秸秆粉碎旋耕还田(TR)、两倍量秸秆集中掩埋还田(TB),以秸秆不还田(CK)为对照,共计5个处理。每个处理4个重复,共20个小区,随机排列。每个试验小区面积为8 m^2(东西长度2 m,南北长度4 m),各小区之间挖宽30 cm、深40 cm的排水沟作为小区间隔,试验田四周设置宽度为1 m的保护行。每个小区以中线分为南北两部分,北部分还田水稻秸秆,南部分还田油菜秸秆。

水稻秸秆全量还田为1.0 kg/m^2,油菜秸秆全量还田为0.5 kg/m^2。秸秆粉碎旋耕还田方式为秸秆晒干后切碎成5~10 cm的小段,然后人工翻压后与土壤充分混匀,模拟机器旋耕还田,翻压深度为20 cm。秸秆集中掩埋还田方式为整秆还田,掩埋深度为20 cm。秸秆还田时对照区和未掩埋秸秆位置同步进行20 cm深翻。

于2022年10月仅在小区北半部还田水稻秸秆,后种植油菜;2023年5月油菜收获后,仅在小区的南半部还田油菜秸秆,并于2023年6月在小区南北部分同时移栽本试验中的第一季水稻。此时小区北半部的水稻秸秆已还田腐解一个油菜季,而小区南半部的油菜秸秆刚还田;2024年6月移栽本试验的第二季水稻时,小区北半部的水稻秸秆已还田两个油菜季和一个水稻季,小区南半部的油菜秸秆已还田一个水稻季和一个油菜季。秸秆均为一次性还田,后续采用免耕移栽的方式进行作物种植。

供试水稻品种为“徽两优982”,于每年6月上中旬移栽,10月上中旬收获,移栽行距30 cm、株距20 cm。水稻田施肥量为N 12 kg/667 m^2、P_2O_5 4.8 kg/667 m^2、K_2O 8.4 kg/667 m^2。其中磷肥和钾肥均作基肥一次性施用,氮肥按基肥、分蘖肥和穗肥6:2:2分3次施用。基肥撒施后与表土混匀,移栽水稻幼苗。除处理外,其他田间管理措施同当地大田生产。

1.3 样品采集与分析

于水稻成熟后,在每个小区的两个稻油秸秆还田区域内,分别采用五点取样法[20],按10 cm分3个土层采集土壤样品至30 cm,剔除根系和杂物后自然阴干,过筛后测定土壤总有机碳(TOC)和活性有机碳(AOC)。土壤总有机碳含量采用高温外热

$K_2Cr_2O_7$氧化-容量法[20]测定；土壤活性有机碳含量采用$K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4法[21]测定，并计算土壤碳库管理指数（CPMI）[22]。取水稻单株考种，统计有效穗数、穗粒数、结实率、千粒质量，计算水稻理论产量（kg/667 m^2）：水稻理论产量＝有效穗数×穗粒数×结实率×千粒质量×10^{-6}；按小区单独收获脱粒，并折算成实收产量。

1.4　数据分析

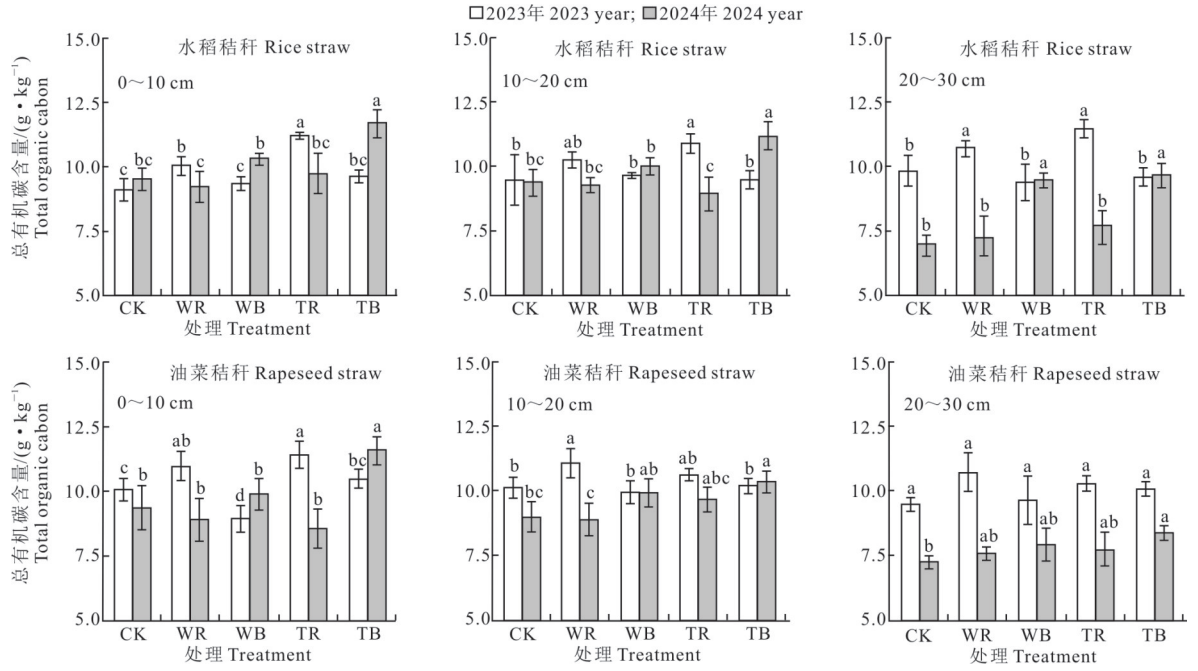
所有试验数据均采用Excel 2021进行计算整理，采用SPSS 26进行差异显著性分析（假设检验概率值设定95%），处理间比较采用Duncan法标注差异显著性，分析结果采用ORIGIN 2021软件进行制图。

2　结果与分析

2.1　秸秆还田对土壤总有机碳含量的影响

2.1.1　水稻秸秆还田对土壤总有机碳含量的影响　图1为不同秸秆还田条件下水稻季0～30 cm土层土壤总有机碳含量。由图1可以看出，2023年水稻秸秆还田一年后，TR处理的0～30 cm土层土壤总有机碳含量比其相应CK分别显著增加23.09%，13.10%和16.58%（$P<0.05$）；2024年水稻秸秆还田两年后，TB处理的0～30 cm土层土壤总有机碳含量比其相应CK分别显著增加22.82%，18.70%和37.88%（$P<0.05$）。同时TB处理下2024年0～30 cm土层的土壤总有机碳含量比2023年分别提高了21.66%，17.8%和0.75%。

2.1.2　油菜秸秆还田对土壤总有机碳含量的影响　由图1可以看出，在2023年油菜秸秆还田一个水稻季后，与CK相比，TR处理的0～10 cm土层土壤总有机碳含量显著增加13.44%，WR处理的0～20 cm土层土壤总有机碳含量显著增加9.32%和13.28%（$P<0.05$）；在2024年油菜秸秆还田两个水稻季和一个油菜季后，TB处理的0～30 cm土层土壤总有机碳含量比其相应CK分别显著增加24.08%，15.33%和15.84%（$P<0.05$）。同时TB处理下的土壤总有机碳含量在0～20 cm土层比2023年分别提高了10.64%和1.77%。



CK. 秸秆不还田；WR. 全量秸秆粉碎旋耕还田；WB. 全量秸秆集中掩埋还田；TR. 两倍量秸秆粉碎旋耕还田；TB. 两倍量秸秆集中掩埋还田。图柱上标不同小写字母表示在5%概率水平差异显著。下同。

CK. No straw incorporation; WR: Full amount of straw shredding and rotary tillage incorporation; WB. Full amount of straw centralized burial incorporation; TR. Double amount of straw shredding and rotary tillage incorporation; TB. Double amount of straw centralized burial incorporation. Different lowercase letters above bars indicate significant differences at $P<0.05$. The same below.

图1　不同秸秆还田条件下水稻季不同土层土壤的总有机碳含量

Fig. 1　Total soil organic carbon content in different soil layers during the rice growing season under different straw return conditions

2.2　秸秆还田对土壤活性有机碳含量的影响

2.2.1　水稻秸秆还田对土壤活性有机碳含量的影响　不同秸秆还田条件下水稻季土壤活性有机碳含量如图2所示。由图2可以看出，在2023年水稻

秸秆还田一年后,与CK相比,TR处理的0～20 cm土层土壤活性有机碳含量显著增加45.71%和70.97%($P<0.05$),TB处理的20～30 cm土层土壤活性有机碳含量显著增加43.75%($P<0.05$);在2024年水稻秸秆还田两年后,TB处理各土层的土壤活性有机碳含量均最高,与CK相比,在0～30 cm土层土壤活性有机碳含量分别显著增加了47.22%,36.84%和15.79%($P<0.05$)。同时,TB处理下2024年0～20 cm土层的土壤活性有机碳含量比2023年提高了13.48%和12.14%。

2.2.2 油菜秸秆还田对土壤活性有机碳含量的影响 由图2可以看出,在2023年油菜秸秆还田一个水稻季后,与CK相比,两种秸秆粉碎旋耕处理提高了3个土层的土壤活性有机碳含量;TR处理下0～30 cm土层的土壤活性有机碳含量均为最高,比CK分别显著增加了21.95%,18.92%和48.28%($P<0.05$);2024年,在油菜秸秆还田腐解了两个水稻季和一个油菜季后,TB在0～30 cm土层的土壤活性有机碳含量较CK分别显著增加了47.06%,29.41%和41.38%($P<0.05$)。同时TB处理下2024年0～30 cm土层土壤活性有机碳含量比2023年分别提高了31.58%,15.93%和7.89%。

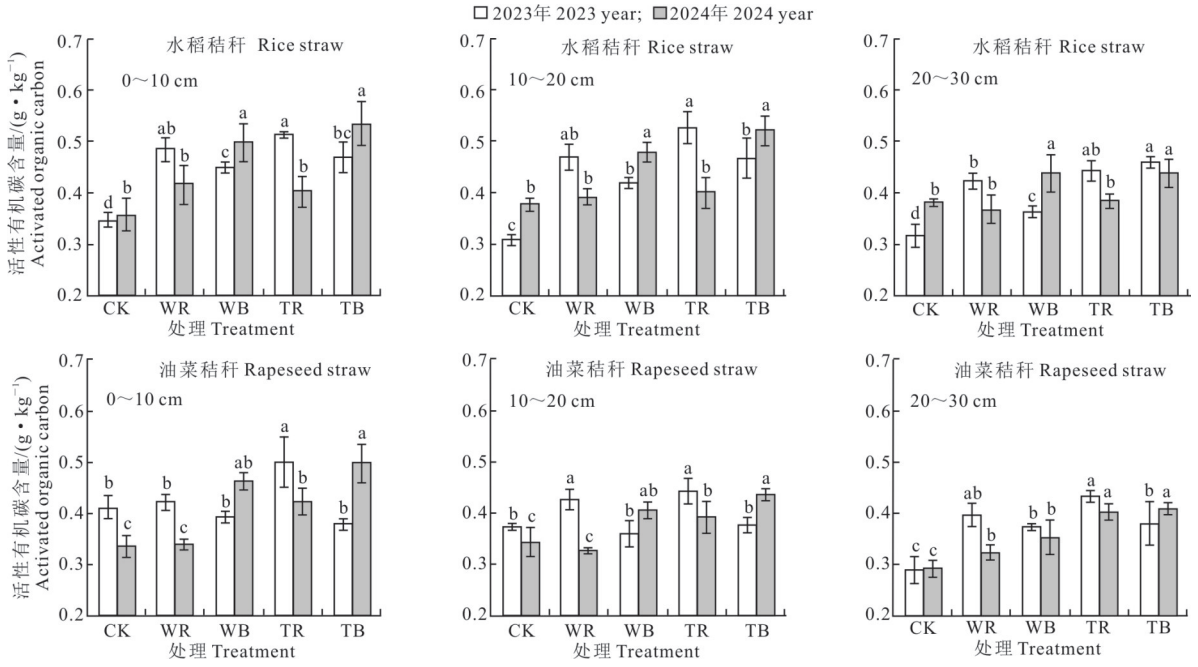


图2 不同秸秆还田条件下水稻季不同土层土壤活性有机碳含量

Fig. 2 Soil active organic carbon content in different soil layers during the rice growing season under different straw return conditions

2.3 秸秆还田对土壤碳库管理指数的影响

2.3.1 水稻秸秆还田对土壤碳库管理指数的影响 水稻秸秆还田条件下土壤碳库管理指数如表1所示。由表1可以看出,在2023年水稻季,水稻秸秆还田处理均能增加土壤碳库管理指数,且在3个土层的变化均较为显著($P<0.05$)。在0～10 cm土层,CPMI变化趋势依次为TR>WR>TB>WB>CK,较CK分别显著增加了50.04%,42.84%,39.18%和33.35%($P<0.05$);在10～20 cm土层,CPMI变化趋势与0～10 cm土层保持一致,较CK分别显著增加了71.74%,53.28%,53.22%和36.47%($P<0.05$);在20～30 cm土层,CPMI变化趋势依次为TB>TR>WR>WB>CK,较CK分别显著增加了48.87%,42.16%,35.05%和15.13%($P<0.05$)。2024年水稻季,TB处理下,在0～30 cm土层CPMI均为最高值,较CK显著增加了50.73%,38.68%和13.51%($P<0.05$)。

2.3.2 油菜秸秆还田对土壤碳库管理指数的影响 油菜秸秆还田条件下的土壤碳库管理指数如表2所示。由表2可知,在2023年水稻季,TR处理下,在0～30 cm土层的CPMI变化较为显著($P<0.05$),与CK相比,增幅分别达到21.66%,19.64%和51.17%($P<0.05$)。在2024年水稻季,TB处理下,在0～30 cm土层的CPMI变化较为显著($P<0.05$),较CK分别显著增加了48.43%,27.79%和41.28%($P<0.05$)。

表 1　水稻秸秆还田下不同土层土壤碳库管理指数

Table 1　Soil carbon pool management index of different soil layers under rice straw return

年份 Year	处理 Treatment	0～10 cm 土层 0－10 cm soil layer	10～20 cm 土层 10－20 cm soil layer	20～30 cm 土层 20－30 cm soil layer
2023	CK	100.00±0.00 c	100.00±0.00 c	100.00±0.00 d
	WR	142.84±5.83 ab	153.28±16.34 ab	135.05±6.64 b
	WB	133.35±2.82 b	136.47±5.01 b	115.13±3.58 c
	TR	150.04±1.46 a	171.74±11.02 a	142.16±7.44 ab
	TB	139.18±9.16 b	153.22±15.28 ab	148.87±2.81 a
2024	CK	100.00±0.00 b	100.00±0.00 b	100.00±0.00 b
	WR	117.53±10.55 b	103.92±4.65 b	95.75±8.60 b
	WB	141.04±12.06 a	126.77±6.06 a	113.21±9.22 a
	TR	115.15±7.54 b	106.04±18.21 b	101.07±3.17 b
	TB	150.73±14.42 a	138.68±8.22 a	113.51±6.00 a

注：表中数据为4个小区的均值±标准差。同列数据后标不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note: Data are presented as mean±standard deviation for four residential areas. Different lowercase letters within a column indicate significant differences at $P<0.05$. The same below.

表 2　油菜秸秆还田下不同土层土壤碳库管理指数

Table 2　Soil carbon pool management index in different soil layers under rapeseed straw return

年份 Year	处理 Treatment	0～10 cm 土层 0－10 cm soil layer	10～20 cm 土层 10－20 cm soil layer	20～30 cm 土层 20－30 cm soil layer
2023	CK	100.00±0.00 b	100.00±0.00 b	100.00±0.00 c
	WR	101.70±3.43 b	114.01±7.37 a	136.31±7.06 b
	WB	94.75±5.06 b	95.42±7.21 b	128.16±1.54 b
	TR	121.66±13.05 a	119.64±7.56 a	151.17±6.07 a
	TB	92.08±2.55 b	100.71±4.17 b	132.00±15.30 b
2024	CK	100.00±0.00 c	100.00±0.00 c	100.00±0.00 c
	WR	102.01±3.52 c	94.10±2.14 c	111.44±6.67 b
	WB	138.82±5.60 ab	118.63±3.62 b	121.77±12.61 b
	TR	126.49±7.26 b	114.32±8.91 b	140.16±5.15 a
	TB	148.43±12.05 a	127.79±4.06 a	141.28±3.67 a

2.4　土壤碳库的三因素方差分析

不同土层土壤碳库指标的三因素方差分析结果如表3所示。

表 3　不同土层土壤碳库指标的三因素方差分析

Table 3　Three-factor ANOVA of soil carbon pool indicators at different soil layers

年份 Year	类型 Type	总有机碳 TOC			活性有机碳 AOC			碳库管理指数 CPMI		
		0～10 cm	10～20 cm	20～30 cm	0～10 cm	10～20 cm	20～30 cm	0～10 cm	10～20 cm	20～30 cm
2023	S	29.613**	7.600*	1.188	3.821	8.949**	13.502**	204.839**	122.067**	0.259
	M	66.877**	11.540**	17.984**	21.632**	23.551**	7.595*	27.477**	18.944**	10.297**
	A	39.024**	3.157	5.310*	39.297**	62.504**	104.649**	71.403**	59.027**	147.380**
	S×M	1.079	0.202	3.255	2.004	0.217	0.586	2.225	0.017	1.249
	S×A	3.677*	0.545	0.805	23.313**	29.394**	2.127	51.326**	32.097**	2.369
	M×A	16.832**	2.891	4.595*	8.274**	5.918**	2.760	10.542**	4.747*	3.720*
	S×M×A	7.317**	1.630	2.050	2.631	0.084	4.647*	3.439	0.009	6.973**
2024	S	6.798*	2.215	4.292	8.440**	36.368**	54.790**	0.285	2.431	54.810**
	M	58.628**	30.182**	31.011**	46.460**	41.212**	13.981**	52.177**	50.227**	11.288**
	A	15.019**	12.484**	23.084**	50.589**	27.286**	32.394**	59.036**	32.488**	45.896**
	S×M	1.026	1.963	11.712**	0.012	2.628	4.245	0	1.759	2.249
	S×A	0.687	0.631	3.292	2.307	1.299	11.501**	2.093	1.623	22.692**
	M×A	22.080**	8.779**	7.753**	11.615**	10.306**	4.233*	13.066**	12.564**	3.824*
	S×M×A	1.415	4.202*	3.186	1.839	2.048	1.066	2.045	2.315	0.648

注：S. 秸秆类型；M. 秸秆还田方式；A. 秸秆还田量。

Note: S. Straw types; M. Straw incorporation method; A. Straw incorporation rate.

由表3可以看出，2023年，秸秆类型单因素对0～20 cm土层的土壤总有机碳和碳库管理指数，以

及10～30 cm土层的土壤活性有机碳具有显著影响;秸秆还田方式单一因素对0～30 cm土层的土壤总有机碳、活性有机碳和碳库管理指数均具有显著影响;在秸秆还田量单因素下,对除10～30 cm土层的土壤总有机碳之外的所有指标均具有极显著影响。在秸秆类型×秸秆还田量双因素互作效应下,对0～10 cm土层的土壤总有机碳,以及0～20 cm土层的土壤活性有机碳和碳库管理指数具有显著影响;在秸秆还田方式×秸秆还田量双因素互作效应下,对0～10 cm土层的土壤总有机碳和碳库管理指数,以及0～20 cm土层的土壤活性有机碳具有极显著影响。在秸秆类型×秸秆还田方式×秸秆还田量三因素互作效应下,对0～10 cm土层的土壤总有机碳,以及20～30 cm土层的土壤碳库管理指数具有极显著影响。

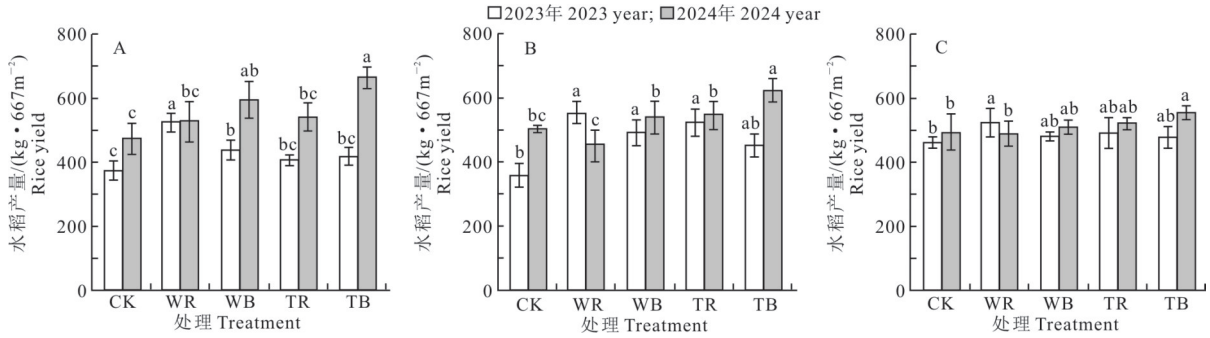
由表3还可以看出,2024年,秸秆类型单因素对0～30 cm土层的土壤活性有机碳,以及20～30 cm土层的土壤碳库管理指数具有极显著影响;秸秆还田方式、秸秆还田量单一因素对0～30 cm土层的土壤总有机碳、活性有机碳和碳库管理指数均具有极显著影响。秸秆类型×秸秆还田方式双因素互作效应下,仅对20～30 cm土层的土壤总有机碳具有极显著影响;在秸秆类型×秸秆还田量双因素互作效应下,对20～30 cm土层的土壤活性有机碳和碳库管理指数具有极显著影响;在秸秆还田方式×秸秆还田量双因素互作效应下,对0～30 cm土层的土壤总有机碳、活性有机碳以及碳库管理指数均具有显著影响。

2.5 秸秆还田对水稻产量的影响

2.5.1 *水稻秸秆还田对水稻理论产量的影响* 水稻秸秆还田处理下的水稻理论产量如图3-A所示。由图3-A可以看出,在2023年,水稻秸秆还田一年后,与CK相比,WR处理的水稻理论产量显著提高40.62%($P<0.05$);2024年,水稻秸秆还田两年后,TB处理的水稻理论产量比CK显著提高40.54%($P<0.05$)。

2.5.2 *油菜秸秆还田对水稻理论产量的影响* 从图3-B可以看出,油菜秸秆还田条件下,不同处理的水稻理论产量变化趋势与水稻秸秆还田条件下保持一致,其中2023年WR处理下的水稻理论产量最高,2024年TB处理下的水稻理论产量最高,较CK分别显著提高了54.38%和23.41%($P<0.05$)。

2.5.3 *稻油秸秆还田对水稻实收产量的影响* 图3-C为稻油秸秆还田下不同处理的实收产量。从图3-C可以看出,在2023年水稻季,水稻实收产量的变化趋势依次为WR>TR>WB>TB>CK,其中WR处理下的水稻实收产量比CK显著提高了13.41%($P<0.05$);2024年水稻实收产量的变化趋势依次为TB>TR>WB>CK>WR,与CK相比,TB处理下的水稻实收产量显著提高了13.68%($P<0.05$)。相同处理下,TB处理第二年的水稻实收产量比第一年增长最大,增幅为16.68%。



A. 水稻秸秆还田条件下水稻理论产量;B. 油菜秸秆还田条件下水稻理论产量;C. 稻油秸秆还田条件下水稻实收产量。
A. Theoretical yield of rice under rice straw return conditions; B. Theoretical yield of rice under rapeseed straw return conditions; C. Actual yield of rice under rice-rapeseed straw return conditions.

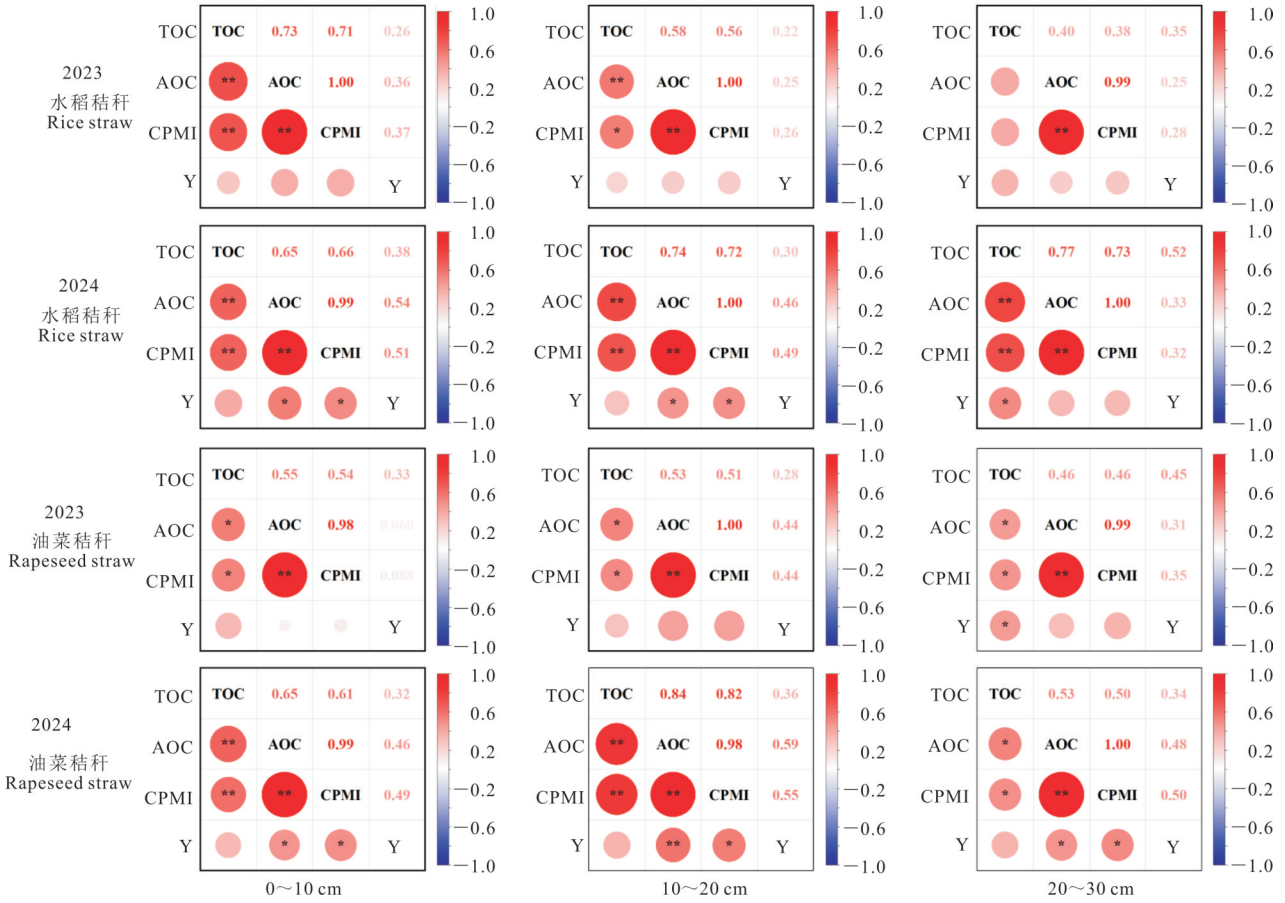
图3 不同秸秆还田条件下的水稻产量
Fig. 3 Rice yield under different straw return treatments

2.6 秸秆还田下土壤碳库与作物产量的相关关系

2.6.1 *水稻秸秆还田下土壤碳库与作物产量的相关关系* 水稻季水稻秸秆还田下,不同土层土壤碳库与水稻产量的相关性结果见图4。图4结果表明,2023年,AOC、CPMI与TOC在0～20 cm土层呈显著正相关;AOC与CPMI在0～30 cm土层均呈极显著正相关。2024年,AOC、CPMI与TOC在0～30 cm土层均呈极显著正相关;AOC、CPMI与产量在0～20 cm土层呈显著正相关;AOC与CPMI在0～30 cm土层均呈极显著正相关;TOC与产量在20～

30 cm 土层呈显著正相关。

2.6.2　油菜秸秆还田下土壤碳库与作物产量的相关关系　由图 4 可以看出，与水稻秸秆还田条件下类似，油菜秸秆还田下土壤碳库产量指标两两之间也均呈显著或极显著正相关。2023 年，AOC、CPMI 与 TOC 在 0～30 cm 土层均呈显著正相关（$P<0.05$）；AOC 与 CPMI 在 0～30 cm 土层均呈极显著正相关（$P<0.01$）；TOC 与产量在 20～30 cm 土层呈显著正相关（$P<0.05$）。2024 年，AOC、CPMI 与 TOC 在 0～20 cm 土层呈极显著正相关（$P<0.01$），在 20～30 cm 土层呈显著正相关（$P<0.05$）；AOC 与 CPMI 在 0～30 cm 土层均呈极显著正相关（$P<0.01$）；AOC、CPMI 与产量在 0～30 cm 土层均呈显著正相关（$P<0.05$）。



Y 表示作物产量；*、** 分别表示显著、极显著相关；右侧彩色条带表示相关系数。

Y is crop yield; *, ** represent significant and extremely significant correlations respectively.

The colored strip on the right represent the correlation coefficient.

图 4　不同秸秆还田条件下土壤不同土层碳库与作物产量间的相关性

Fig. 4　Correlations between soil carbon pool and crop yield in different soil layers under different straw return conditions

3　讨　论

3.1　秸秆还田对土壤碳库的影响

本试验结果表明，秸秆粉碎旋耕还田处理在第一年显著提高了土壤总有机碳含量，这与 ZHANG 等[23]的研究结果相似。两倍量秸秆粉碎旋耕处理第一年由于好氧菌快速矿化为可溶性有机碳（DOC）[24]，使得不同土壤总有机碳含量呈爆发式积累；当第二年由于碳源的耗尽，团聚体稳定性降低，有机质的矿化加速而导致土壤总有机碳含量较第一年降低。两倍量秸秆集中掩埋还田处理由于厌氧环境，在初期抑制秸秆的分解，因此土壤总有机碳的积累速度较慢，在第二年真菌坏死体通过与矿物质结合[25]，土壤总有机碳的稳定性显著提升。

本研究结果表明，两倍量秸秆粉碎旋耕还田处理下，第一年显著提高了 0～20 cm 土层土壤活性有机碳含量，这与丛萍等[26]和 WANG 等[27]的研究结果基本一致。由于秸秆粉碎旋耕还田处理下的秸秆形态更碎小，与 0～20 cm 土层的土壤混合更均匀，增大了接触面积，促进好氧微生物快速附着分解[26]，秸秆腐解的速度高于集中掩埋处理，因此进一步加速了土壤活性有机碳的释放。由于秸秆粉

碎旋耕还田为好氧环境主导,且旋耕处理增强了土壤的通气性,好氧菌在0～20 cm土层大量增殖,分泌胞外酶分解秸秆多糖,释放可溶性有机碳(DOC)以及轻组有机碳[28],使得土壤活性有机碳在第一年内达到峰值。同时旋耕处理下秸秆腐解速率更快,使得释放速效养分的速度也更快,快速释放的铵态氮、速效钾等能满足微生物的碳氮需求,避免了腐解初期的氮竞争,且两倍量秸秆提供了双倍的碳源,因此两倍量秸秆粉碎旋耕还田在0～20 cm土层下同步提升。KAN等[29]研究表明,在厌氧环境下深埋秸秆持续腐解,真菌群落增殖,其坏死体与亚耕层矿物结合形成矿物结合态真菌坏死体碳(MAOC-FNC),该形态碳占活性有机碳增量的56.8%,稳定性高、抗矿化能力强。因此秸秆集中掩埋处理下,第二年土壤活性有机碳含量全量提升,同时秸秆粉碎旋耕还田处理由于第一年好氧菌快速矿化消耗大部分纤维素和半纤维素等易分解碳,剩余木质素等难分解组分难以支撑微生物的持续活动[30],导致活性有机碳含量下降;且旋耕处理容易导致活性有机碳暴露于氧气中加速矿化[25],次年下降的幅度更大。

碳库管理指数(CPMI)是量化碳库指数与碳库活度指数的综合指标,用于表征土壤有机碳储量及其稳定性的变化规律[31]。本研究结果表明,秸秆粉碎旋耕还田处理提高了第一年0～20 cm土层的CPMI,这与李怡燃等[32]的研究结果基本相同。由于该处理下的秸秆与土壤充分接触,秸秆腐解更快,促进好氧微生物加速矿化秸秆,释放DOC和轻组有机碳(LFOC),且两倍量秸秆提供了充足的碳源,加速了碳的释放,使得在0～20 cm土层的CPMI在第一年就达到了峰值,而由厌氧主导的秸秆集中掩埋处理则有着“长期优势”。秸秆深埋地下20 cm,形成厌氧环境,促进真菌漆酶木质素转化的真菌坏死体碳(MAOC-FNC)与黏粒结合构成稳定腐殖质[29],而两倍量提供的碳源相比全量更加充足。刘雅杰等[33]研究表明,第二年两倍量秸秆还田处理下的MAOC-FNC生成量较全量秸秆还田处理增加38%,显著提高了CPMI。同时,由于团聚体的物理保护,腐殖质胶结土壤颗粒形成水稳性团聚体(>0.25 mm的团聚体增加102.5倍[32]),减少了碳的矿化损失。综上所述,秸秆的旋耕处理通过好氧菌快速矿化,提升了耕层土壤活性有机碳等碳含量,但稳定性较差,CPMI呈“速升速降”;而秸秆集中掩埋下,依靠真菌腐殖化-矿物保护层形成稳定碳库,CPMI呈“缓升累积”,说明两倍量秸秆掩埋是突破耕层碳饱和的关键途径。

从稻油两种秸秆还田的效果来看,水稻秸秆在提升土壤有机碳含量方面普遍优于油菜秸秆,这与其化学组成和分解速率有关。通常水稻秸秆具有比油菜秸秆更高的碳氮比和木质素含量[30]。因此在还田初期,油菜秸秆快速分解会强烈刺激土壤微生物活性,这种激发效应在秸秆粉碎旋耕还田条件下得到充分发挥,可能促进了土壤中原有难分解有机质的矿化,导致短期内碳的快速释放和转化[24],但这种状态不稳定,碳容易损失。于是在试验的第二年,这种短期效应减弱,水稻秸秆的长期优势得以体现。水稻秸秆的高C/N值和木质素含量使其成为一个缓慢分解的“碳库”。微生物分解秸秆需要更长时间,该过程中会产生更多难以被进一步分解的腐殖化物质,进而更有效地固存在土壤中,从而提升碳含量。

3.2 秸秆还田对水稻产量的影响

WANG等[34]研究表明,秸秆粉碎旋耕使得秸秆与土壤充分混合,好氧菌快速分解秸秆,释放氨态氮,直接满足分蘖期的氮需求,促进有效穗数增加6.2%～9.9%,穗粒数显著提升,且秸秆粉碎旋耕还田处理下,秸秆腐解前期释放的氮素匹配灌浆需求,在水稻灌浆期达到碳氮协调,进而减少颖花退化;集中掩埋处理因深层腐解需要消耗大量的氮(C/N>30),抑制了灌浆物质的积累。褚添硕等[35]研究表明,秸秆粉碎旋耕还田处理下的秸秆由于更小,与土壤混合更均匀,腐解环境以好氧为主导,秸秆腐解快,而集中掩埋处理下的秸秆为整杆掩埋,且腐解环境为厌氧主导,因此秸秆腐解慢,在还田一年内的腐解率为40%～50%,因此养分释放也就不同。前人研究表明,集中掩埋处理的秸秆于次年释放累计的速效钾增加32%,显著促进了颖花的分化与伸长,同时腐解形成的腐殖质胶结土壤颗粒,降低了土壤体积质量(降低0.09～0.15 g/cm^3),增强土壤的保水性(持水量增加15%),根系深扎吸收深层养分,支撑大穗的形成[36]。

土壤碳库与作物产量的相关关系也表明,稻油秸秆还田下土壤不同土层间碳库产量指标两两之间也均呈显著或极显著的正相关关系,表现为TOC、AOC、CPMI的提升与水稻产量的正相关关系。这也说明了秸秆还田通过有机碳输入,从而实现改善土壤结构及调控养分缓释等一系列连锁反

应，构建了一个更丰富、更活跃、更稳定的土壤碳库系统。这个优化的土壤生态系统最终通过为水稻生长提供更长效的养分供应及更佳的水肥气热根际环境，从而显著且持续地提高了水稻产量。不同秸秆还田方式和还田量，本质上调控了这个系统过程的“强度”和“节奏”：粉碎旋耕处理更“快而猛”，集中掩埋处理则更“稳而久”；高还田量则提供了更大的“碳源驱动力”；时间（腐解周期）则是让这些效应得以充分转化和体现的必要条件。

4　结　论

秸秆粉碎旋耕还田处理在秸秆还田一年内对土壤碳库及产量的促进效果更显著；集中掩埋处理在秸秆腐解一年后，仍然对土壤固碳效应及水稻产量有着显著的促进影响，表现出一定的还田后效，尤其以两倍量秸秆集中掩埋处理表现更为突出，同时一定程度上解决了作物高产、超高产背景下大量秸秆的处理问题，可在淮河、长江流域的稻油轮作区推广与应用。但这种效果的持续时间还需进一步验证。

[参考文献]

[1] 李小坤，任涛，鲁剑巍，等．长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控[J]．华中农业大学学报，2021，40(3)：13-20.
LI X K，REN T，LU J W，et al. Comprehensive regulation of nitrogen fertilizer yield and efficiency in the rice-rapeseed rotation system in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(3)：13-20.

[2] 农业农村部．农业农村部办公厅关于做好2023年农作物秸秆综合利用工作[A/OL]．(2023-05-23)[2025-11-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6885403.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Circular of the general office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on effectively implementing the comprehensive utilization of crop straw in 2023[A/OL]. (2023-05-23)[2025-11-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6885403.htm.

[3] LIU Z H，KUZYAKOV Y，FANG J，et al. Hotspots of enzyme activities reflect micro-scale heterogeneity in nutrient mobilization in paddy soils[J]. Plant and Soil，2025，513(1)：1433-1450.

[4] BAGHERI NOVAIR S，MIRSEYED HOSSEINI H，ETESAMI H，et al. Straw application improved soil biological properties and the growth of rice plant under low water irrigation[J]. Environmental Research，2024，255：119138.

[5] ZHANG H L，CHEN L，WANG Y S，et al. Straw and green manure return can improve soil fertility and rice yield in long-term cultivation paddy fields with high initial organic matter content[J]. Plants，2025，14(13)：1967.

[6] CHEN L M，SUN S L，YAO B，et al. Effects of straw return and straw biochar on soil properties and crop growth：a review [J]. Frontiers in Plant Science，2022，13：986763.

[7] YUAN Y，LIU H，LIANG Y，et al. Effects of maize straw return modes on soil organic carbon content and aggregate stability in a mollisol in Northeast China[J]. Moscow University Soil Science Bulletin，2024，79(5)：693-702.

[8] LIN H Y，ZHENG J，ZHOU M H，et al. Crop straw incorporation increases the soil carbon stock by improving the soil aggregate structure without stimulating soil heterotrophic respiration [J]. Journal of Integrative Agriculture，2025，24(4)：1542-1561.

[9] SARNO M，BARONE E，GRISTINA L. Carbon input and crop residue placement determine the carbon sequestration efficiency of soil management techniques[J]. Agronomy，2025，15(6)：1293.

[10] 高洪军，彭畅，张秀芝，等．秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响[J]．中国农业科学，2020，53(22)：4613-4622.
GAO H J，PENG C，ZHANG X Z，et al. Effects of straw returning amount on the change characteristics and carbon fixation efficiency of soil and aggregates in black soil region[J]. Scientia Agricultura Sinica，2020，53(22)：4613-4622.

[11] CHE S H，XU Y F，QIN X T，et al. Building microbial consortia to enhance straw degradation，phosphorus solubilization，and soil fertility for rice growth[J]. Microbial Cell Factories，2024，23(1)：232.

[12] 徐蒋来，胡乃娟，张政文，等．连续秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响[J]．土壤，2016，48(1)：71-75.
XU J L，HU N J，ZHANG Z W，et al. Effects of continuous straw return on soil nutrients and carbon pools in rice-wheat rotation fields[J]. Soils，2016，48(1)：71-75.

[13] ZHANG N，BAI L Y，WEI X X，et al. Promoted decomposition in straw return to double-cropped rice fields controls soil acidity，increases soil fertility and improves rice yield[J]. Chemical Engineering Journal，2025，509：161309.

[14] 彭志芸，吕旭，伍杂日曲，等．麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对土壤氮素供应及直播稻产量的影响[J]．浙江大学学报(农业与生命科学版)，2022，48(1)：45-56.
PENG Z Y，LÜ X，WU Z，et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on soil nitrogen supply and direct-seeded rice yield under wheat (oilseed)-rice rotation[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)，2022，48(1)：45-56.

[15] 韦叶娜，王学春，赵祥，等．油菜秸秆还田对水稻根系及分蘖生长的影响[J]．云南大学学报(自然科学版)，2018，40(3)：609-618.
WEI Y N，WANG X C，ZHAO X，et al. The effect of rapeseed straw return to the field on rice root system and tillering growth[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)，2018，40(3)：609-618.

[16] 何巧玲，杨刚，邹兰，等．油菜秸秆不同还田方式下水稻碳足迹分析[J]．西南农业学报，2022，35(7)：1673-1679.
HE Q L，YANG G，ZOU L，et al. Carbon footprints of rice un-

der different managements of rapeseed straw[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(7): 1673-1679.

[17] LI J, ZHANG H, XIE W Y, et al. Elevated CO_2 increases soil redox potential by promoting root radial oxygen loss in paddy field[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, 136: 11-20.

[18] CHEN X W, LUO G W, ZHU R B, et al. Straw returning amount and duration influence paddy soil organic carbon sequestration by regulating plant-and microbe-derived carbon accumulation[J]. Land Degradation & Development, 2025, 36(11): 3729-3741.

[19] WANG X H, YANG H S, LIU J, et al. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice-wheat rotation system[J]. Catena, 2015, 127: 56-63.

[20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
LU R K. Methods of agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[21] 周伟, 吴红慧, 张运龙, 等. 土壤活性有机碳测定方法的改良[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 70-75.
ZHOU W, WU H H, ZHANG Y L, et al. Improvement of the method for determining soil active organic carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(1): 70-75.

[22] 徐明岗, 于荣, 王伯仁, 等. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.
XU M G, YU R, WANG B R, et al. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 723-729.

[23] ZHANG S T, REN T, FANG Y T, et al. Enhancing soil labile organic matter through oilseed rape-rice rotation and straw returning in paddy-upland systems[J]. Plant and Soil, 2025: 1-18.

[24] CHEN S T, XIA X, FENG X, et al. Short-term crop residue amendments altered the chemodiversity and thermodynamic stability of dissolvable organic matter in paddy soil[J]. European Journal of Soil Science, 2024, 75(6): e70027.

[25] LIU J, CHEN Y L, DU Z L, et al. Biochar and straw application reshape organic carbon pool *via* altering soil carbon pump function based on a decadal field experiment[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 253: 106662.

[26] 丛萍, 逄焕成, 王婧, 等. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 811-823.
CONG P, PANG H C, WANG J, et al. Effect of crushing and returning granular straw in high quantity on improving soil organic carbon in sub-tillage layer of black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 811-823.

[27] WANG N, AI Z P, ZHANG Q Y, et al. Influence of long-term inorganic fertilization and straw incorporation on soil organic carbon: roles of enzyme activity, labile organic carbon fractions, soil aggregates, and microbial traits[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 392: 109758.

[28] SHI Y L, LI T T, ZHENG L, et al. Enhancing soil multifunctionality through restoring erosion environment and microbial functions combined with organic manure and straw mulching[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 383: 109515.

[29] KAN Z R, LI Z Z, AMELUNG W, et al. Soil carbon accrual and crop production enhanced by sustainable subsoil management[J]. Nature Geoscience, 2025, 18(7): 631-638.

[30] MEHRAN M, HUANG L, GENG M J, et al. Co-utilization of green manure with straw return enhances the stability of soil organic carbon by regulating iron-mediated stabilization of aggregate-associated organic carbon in paddy soil[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 252: 106624.

[31] BEGUM R, JAHANGIR M M R, JAHIRUDDIN M, et al. Reduced tillage with residue retention improves soil labile carbon pools and carbon lability and management indices in a seven-year trial with wheat-mung bean-rice rotation[J]. Pedosphere, 2022, 32(6): 916-927.

[32] 李怡燃, 王秀薪, 梁耀文, 等. 农田土壤团聚体有机碳对秸秆还田响应的Meta分析[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(1): 41-52.
LI Y R, WANG X X, LIANG Y W, et al. Meta-analysis of the response of soil aggregate organic carbon in farmland to straw returning[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(1): 41-52.

[33] 刘雅杰, 张天娇, 张向前, 等. 秸秆还田下耕作方式对黑土活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(17): 3408-3423.
LIU Y J, ZHANG T J, ZHANG X Q, et al. Effects of tillage methods under straw returning on active organic carbon components and carbon pool management index in black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(17): 3408-3423.

[34] WANG X Y, HUANG J, TAN Y T, et al. Synergistic effects of deep rotary tillage and microbial decomposition agents on straw decomposition, soil nutrient dynamics, and microbial communities in rice systems[J]. Agriculture, 2025, 15(13): 1447.

[35] 褚添硕, 陈晓安, 杜勇强, 等. 不同秸秆还田方式下红壤坡地径流垂向分层输出特征[J]. 中国水土保持科学, 2025, 23(2): 26-34.
CHU T S, CHEN X A, DU Y Q, et al. Characteristics of vertical stratified output of runoff on red soil slopes under different straw-returning methods[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(2): 26-34.

[36] 李心月, 王杰, 鞠梦倩, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对土壤速效钾和水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2025(3): 184-194.
LI X Y, WANG J, JU M Q, et al. Effects of different tillage methods and straw returning on soil available potassium and rice yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2025(3): 184-194.

(责任编辑:屈李纯)